

动水条件下裂隙粗糙度对浆液扩散影响研究

刘伟韬¹, 鲍传瑶¹, 孟祥喜², 孙易达², 徐传亮³

(1. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 安全与环境工程学院, 山东 青岛 266590;

3. 济宁市煤矿安全生产监测监控中心 煤矿安全监控二部, 山东 济宁 272000)

摘要:裂隙的产状和特性对于矿井注浆效果影响较大,且矿井动水条件的影响使浆液扩散机理更为复杂。本研究利用 COMSOL Multiphysics 软件中的两相流数值计算方法,采用节理粗糙度系数(JRC)表征裂隙粗糙度,研究了不同 JRC 对浆液扩散形态、压力、流速、截面流量及封堵率等参数的影响。研究结果表明:JRC 的增加会使浆液沿水流方向的扩散距离缩短,浆液压力升高,但对横向扩散方向和远离注浆孔区域的浆液压力影响较小;同时 JRC 增加会降低浆液流速,浆液堆积会使两侧水流通道变窄导致动水流速增加;JRC 减小可以提高注浆效率,降低出口出水流量,提升堵水效果,JRC 为 18~20 时达到最大封堵率所用时间是 JRC 为 14~16 时的 1.18 倍,是 JRC 为 8~10 时的 1.43 倍。采用相似试验对浆液在不同粗糙程度裂隙内的扩散形态和封堵率进行了验证,试验结果与数值模拟结果基本吻合,进一步验证了数值模拟试验的可行性,研究结果可为裂隙动水注浆理论和工程实践提供参考。

关键词:动水注浆;裂隙粗糙度;浆液扩散;节理粗糙度系数

中图分类号:TD745

文献标志码:A

Study on the influence of fracture roughness on grout slurry diffusion under hydrodynamic conditions

LIU Weitao¹, BAO Chuanyao¹, MENG Xiangxi², SUN Yida², XU Chuanliang³

(1. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

3. Coal Mine Safety Monitoring Second Department, Jining Coal Mine Safety Production Monitoring and Control Center, Jining 272000, China)

Abstract: While the aperture occurrence and characteristics of fractures exert significant effects on grouting effectiveness in mine engineering, hydrodynamic conditions further complicate the grout diffusion mechanism. To address this issue, this study investigated the influences of varying joint roughness coefficient (JRC) values on critical parameters including grout diffusion morphology, pressure distribution, flow velocity, cross-sectional flux, and sealing efficiency by employing a two-phase flow numerical simulation method in COMSOL Multiphysics and utilizing the JRC to characterize fracture roughness. The results show that increased JRC can reduce the grout's longitudinal diffusion distance along the water's flowing direction and elevate the grout's local pressure, but they exhibit limited impact on transverse diffusion and distal pressure fields. Higher JRC induce the slowing down of flow velocity, whereas grout attenuation would narrowing the channels of the flowing water in adjacent pathways, resulting in the increased flow velocity of the hydrodynamic water. Reduced JRC enhance grouting efficiency by

收稿日期:2024-12-31

基金项目:国家自然科学基金项目(51874192);山东省自然科学基金项目(ZR2023ME002)

作者简介:刘伟韬(1970—),男,山东东明人,教授,博士生导师,主要从事矿井防治水研究工作. E-mail:skdlwt@126.com

孙易达(1999—),男,辽宁大连人,博士研究生,主要从事矿井水害防治和注浆材料研发与应用工作,本文通信作者。

E-mail:2649750349@qq.com

decreasing outlet discharge and improving water-blocking performance. Specifically, the time required to achieve maximum sealing efficiency at JRC 18~20 is 1.18 times and 1.43 times required at JRC 14~16 and at JRC 8~10 respectively. Similarity experiments were conducted to validate the simulated diffusion patterns and sealing efficiency. The experimental results demonstrated good consistency with numerical results, verifying the feasibility of the numerical simulation experiments. The findings can provide references for the theory and practice of grouting operations in fractures under hydrodynamic conditions.

Key words: grouting under dynamic water conditions; fracture roughness; slurry diffusion; joint roughness coefficient

在煤炭开采过程中,受复杂多变的地质环境以及开挖卸荷等多重因素的影响,岩体内部衍生出大量裂隙^[1]。岩体内裂隙的存在会严重威胁工程安全,引发系列工程地质灾害,危及工作人员的生命安全。注浆在加固岩体结构、封堵地下水等方面发挥着重要作用。对于大多数注浆工程而言,地下水通常广泛分布于裂隙岩体内部,这使得浆液在裂隙岩体里的扩散过程在本质上成为两相不混溶的流体驱替过程,即通过向裂隙岩体中注入浆液,实现对地下水的有效驱替,进而增强岩体自身的防渗特性和承载能力,确保煤炭开采工作的安全性和可靠性。因此,深入探究裂隙中浆液的两相驱替行为,对于进一步优化注浆技术、提高岩体加固效率具有重要意义。

裂隙岩体浆液扩散数值模拟不仅能可视化观察浆液在裂隙内的扩散形态,还能对浆液的扩散规律定量分析。目前,国内外学者对裂隙岩体注浆扩散规律取得了丰富成果。杨坪等^[9]利用裂隙走向的曲折程度表征裂隙的粗糙度以研究裂隙动水注浆规律,表明扩散距离与注浆时间、注浆压力呈正相关,与裂隙的粗糙程度呈负相关;Wang等^[10]通过建立粗糙裂隙模型研究有效流体体积方法跟踪两相流(即浆液和水)界面,结果表明随着裂隙形态的变化,残余注浆模式表现出不同的特征。李术才等^[11]研发了光滑裂隙动水注浆模拟试验台,并试验分析了浆液的“U”形扩散规律和水泥浆液的分层分区扩散机制,实现了对浆液扩散和封堵效果的定量评价。熊加路^[12]利用不同巴顿曲线形状模拟裂隙面,探究了不同粗糙度下注浆扩散规律及其影响因素。曹健^[13]利用立方体块进行流动水流中的裂隙网络注浆耦合试验,对不同温度下化学浆液在动水中的扩散规律进行了研究。

以上文献对于研究裂隙岩体浆液扩散规律具有积极作用,但目前多集中于单一粗糙程度对注浆扩散规律的影响,而现实地下工程中裂隙粗糙程度呈现多样化,且裂隙内部多含有流动的地下水,针对动水条件下不同粗糙程度裂隙对浆液扩散形态、压力、流速、截面流量及封堵率的相关研究较少。基于此,本研究采用节理粗糙度系数(joint roughness coefficient, JRC)表征裂隙粗糙度^[14],考虑两种流体的密度、黏度因素,利用数值模拟方法对动水条件下不同粗糙程度裂隙下浆液扩散过程中细观参数的变化规律进行研究,旨在为煤矿动水注浆理论和工程实践提供理论参考。

1 裂隙模型建立及试验方案设计

1.1 几何模型

本研究引入 JRC 来表征裂隙面的粗糙程度,建立 JRC 分别为 8~10、14~16 和 18~20 三种不同粗糙程度的平板裂隙模型。巴顿曲线是用于描述 JRC 与节理壁面粗糙程度之间关系的曲线,由岩石力学专家 Nick Barton 提出^[15],其核心公式如下:

$$\tau = \sigma_n \tan \left[\Phi_b + J_{RC} \cdot \lg \left(\frac{J_{CS}}{\sigma_n} \right) \right] \quad (1)$$

式中: τ 为剪切强度; σ_n 为法向应力; Φ_b 为基本摩擦角; J_{CS} 为节理壁面抗压强度; J_{RC} 为节理粗糙度系数,取值范围为 0~20(从完全光滑到极粗糙),对应 10 种标准曲线形态,如图 1 所示。

裂隙模型长度为 1 000 mm、宽 400 mm、开度为 4 mm,右侧为进水边界,左侧为压力恒定边界,注浆孔距离进水边界 250 mm,距离上下边界各 200 mm,注浆孔半径 10 mm,注浆压力为 25 kPa。进水边界水流速度为 0.02 m/s,压力恒定边界压力值为 0,两侧为不透水边界,几何模型如图 2 所示,浆液扩散方向示意图如图 3 所示。

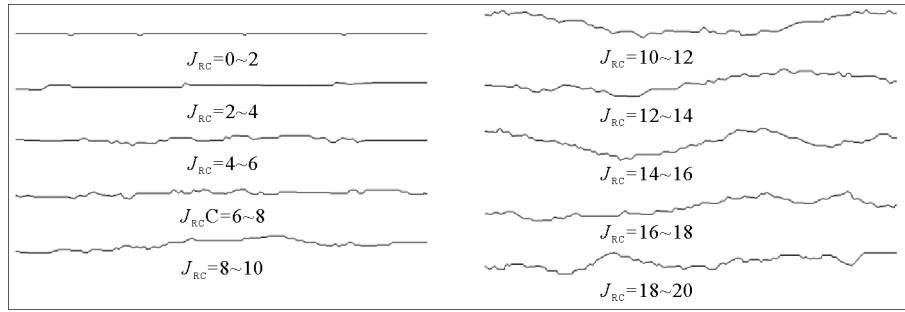


图 1 标准巴顿曲线

Fig. 1 Standard Barton curve

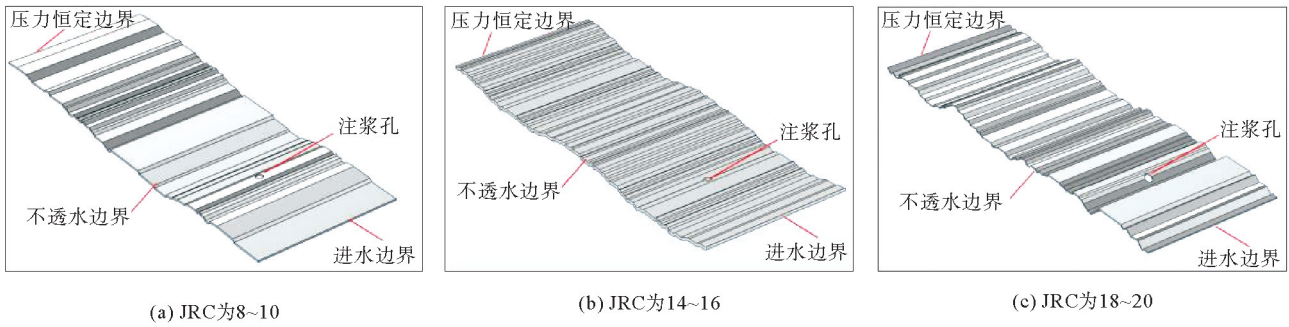


图 2 不同粗糙度的裂隙模型

Fig. 2 Fracture models with different degrees of roughness

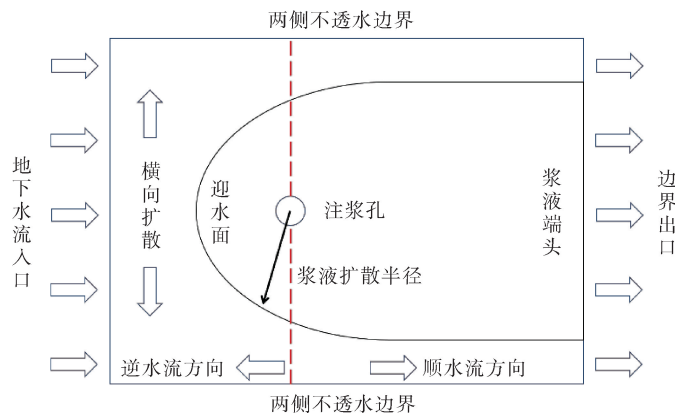


图 3 浆液扩散方向示意图

Fig. 3 Schematic diagram of slurry diffusion direction

1.2 模型控制方程

COMSOL Multiphysics 软件以有限元法为基础,通过求解偏微分方程进行数值仿真计算,不仅具有灵活的图形导入模块,还可以快速实现多物理场建模,在动水注浆领域得到较多的应用,具有较好的适用性^[16-17]。本研究采用 COMSOL Multiphysics 软件求解浆液在动水条件下粗糙裂隙模型中的扩散过程,依托软件流体力学模块中的两相流进行计算,通过水平集方法追踪两种液体相界面的位置,研究动水条件下浆液的扩散形态、流速分布、压力分布、截面流量及封堵率等的变化规律。

模型的控制方程主要由流体运动方程、连续性方程和两相流界面控制方程组成。其中,流体运动方程采

本研究采用统一的网格大小对模型的边界条件进行验证,选择单元数为 2.029×10^6 的网格对模拟结果进行计算分析,计算时间取 40 s。在有限元模型上设 2 条测线,以监测不同参数的变化情况。测线布置如图 5 所示,测线 1 主要监测浆液水流方向的参数变化,测线 2 主要监测浆液横向的参数变化。

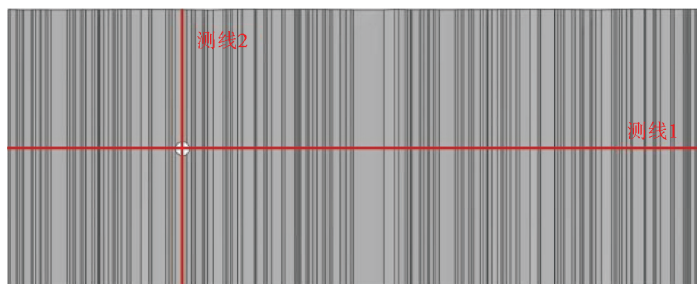


图 5 有限元模型测线布置

Fig. 5 Finite element model survey line arrangement

2 数值模拟结果分析

2.1 裂隙粗糙度对浆液扩散形态分析

以工况 3 为例,即 JRC 为 18~20 时,研究浆液在裂隙内的扩散形态变化,如图 6 所示。随着注浆时间的增加,浆液扩散半径先增大至 12 cm 后降至 9 cm。在初始阶段浆液以近圆形扩散,在顺水流方向端头处浆液扩散形态由圆弧形转变为水平形,整体扩散形态由近圆形转变为“U”形。前期由于浆液黏度较小,浆液扩散较快,扩散半径较大。在注浆中期,随着注浆时间的增加,端头处的浆液扩散形态则由水平形转变成圆弧形,端头圆弧弧度呈现逐渐减小的趋势,浆液整体扩散形态由“U”形转变为椭圆形。后期浆液的黏度逐渐增大导致扩散速度较注浆前期明显减弱,水流的冲刷作用致使浆液端头处形态由水平形逐渐变为弧度减小的圆弧形,且迎水面扩散半径也受冲刷影响而逐渐减小。

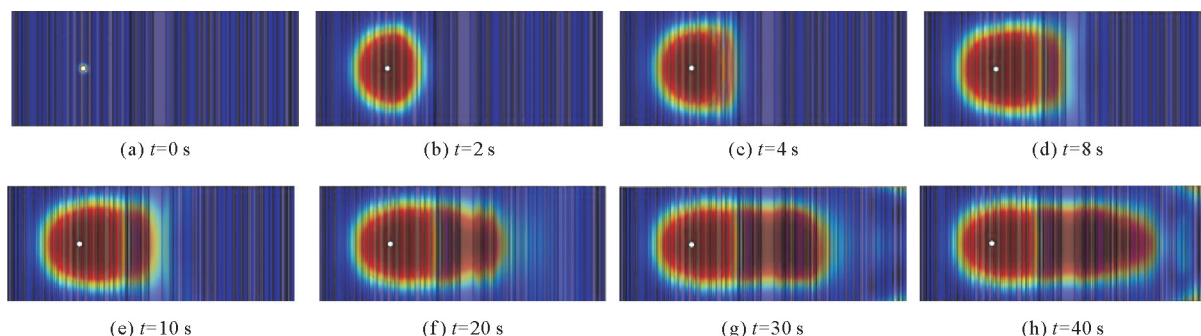


图 6 JRC 为 18~20 的浆液扩散形态

Fig. 6 Diffusion pattern of grout with a joint roughness coefficient (JRC) ranging from 18 to 20

对比工况 1、2、3,分析不同裂隙粗糙度对浆液扩散形态的影响,如图 7 所示。由图 7 可以看出,随着裂隙粗糙度的增加,浆液沿水流方向的扩散距离明显减少,JRC 从 8~10 增加到 14~16,沿水流方向的扩散距离从 0.76 m 减少到 0.68 m,JRC 增加到 18~20 时,扩散距离减少到 0.64 m;横向扩散距离则在 0.23 m 左右波动,且波动幅度不大,表明裂隙粗糙度主要对浆液在水流方向的扩散产生影响。

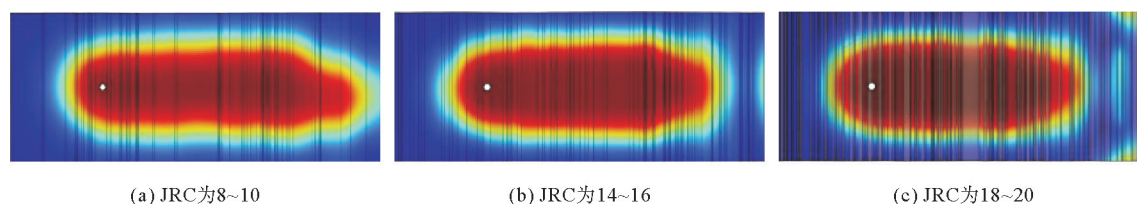


图 7 不同裂隙粗糙度对浆液扩散形态的影响

Fig. 7 Influence of different degrees of fracture roughness on the diffusion pattern of grout

2.2 裂隙粗糙度对浆液压力影响分析

工况3条件下,即JRC为18~20时,浆液压力变化趋势如图8所示,注浆过程中压力自注浆孔向四周逐渐衰减,注浆孔处压力衰减较快,远离注浆孔处的压力衰减逐渐平缓。分析测线1上的压力变化发现,测线1上的压力变化整体呈现先增加后急剧减小的趋势。逆水流方向的压力衰减速度相比于顺水流方向较为缓慢,且逆水流方向的压力较快达到平稳状态,并趋近于稳定。而顺水流方向浆液的压力随扩散距离增加迅速减小,最后逐渐趋近于0。对比不同注浆时间的压力变化,测线1各处浆液压力均随着注浆时间的增加而增加,注浆前期压力增幅较大,后期压力增幅较小。这是因为随着注浆时间的增加,浆液黏度逐渐增大,对于浆液来说,黏度越高,浆液内摩擦力越强,流动就越困难,浆液所受压力与浆液黏度成正比关系。参考图4浆液黏度时变曲线可知,前期浆液黏度增幅较大,因此前期浆液压力变化幅度较大,后期曲线增幅平缓,对应后期浆液压力增幅较为缓慢。分析测线2上的浆液压力显示,测线2上的浆液压力关于测线1呈对称性,压力变化趋势呈现先增加后减小的趋势,不同注浆时间的压力变化趋势同测线1上的趋势基本一致,两侧的的稳定压力值略小于测线1逆水流方向上的。

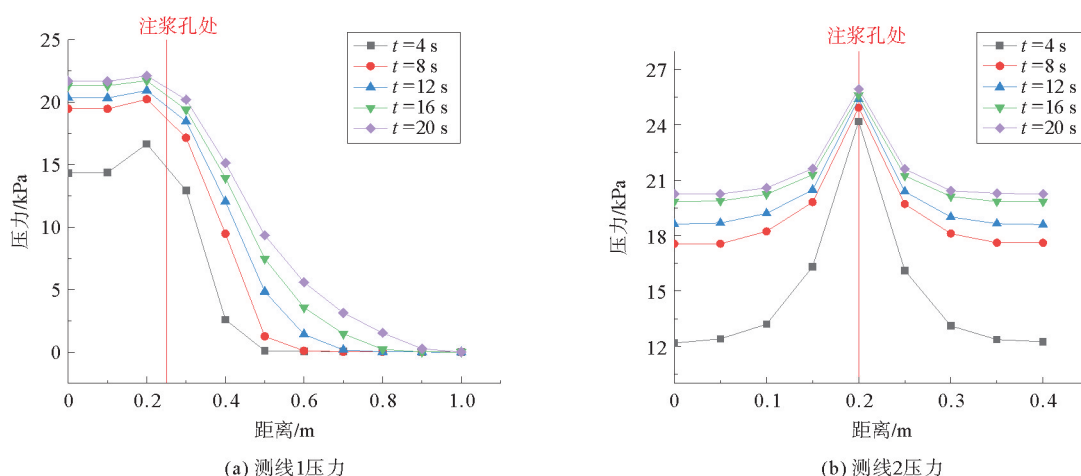


图8 浆液压力变化

Fig. 8 Change of slurry pressure

裂隙粗糙度对浆液压力的影响如图9所示。在测线1、测线2上,由于裂隙粗糙度的增加,浆液扩散阻力增大造成浆液累积,因此产生的浆液压力均随裂隙粗糙度的增加而增大。测线1上,压力高峰在注浆孔处,随着浆液在顺水流方向的扩散,浆液压力随扩散距离的增大而减小,最后趋于0;测线2上,浆液压力先增加后减小,压力高峰在注浆孔处,压力最低处在横向边界处,注浆孔两侧压力变化趋势一致,且关于测线1基本对称。

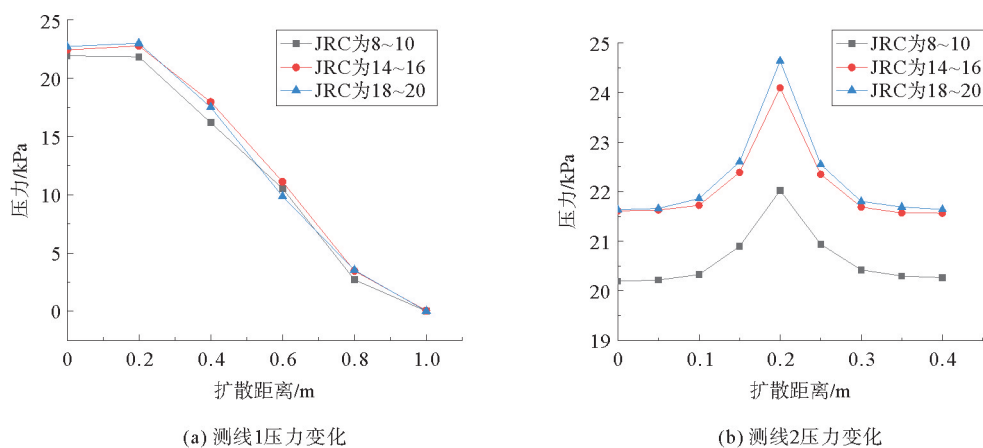


图9 不同裂隙粗糙度对浆液压力的影响

Fig. 9 Influence of different degrees of fracture roughness on the grout pressure

2.3 裂隙粗糙度对流体流速影响分析

选取工况 3 条件下的流速场进行分析,分别以注浆时间 4、16、28、40 s 为例,在测线 1 和测线 2 两个方向上分析流体流速在 JRC 为 18~20 上的变化规律。由图 10 可以看出:随着时间的增加,流体流速呈下降趋势,原因是随着时间的增加,浆液黏度变大,浆液流动所需克服的内摩擦力变大,致使流体流速随着时间的增加呈下降趋势。

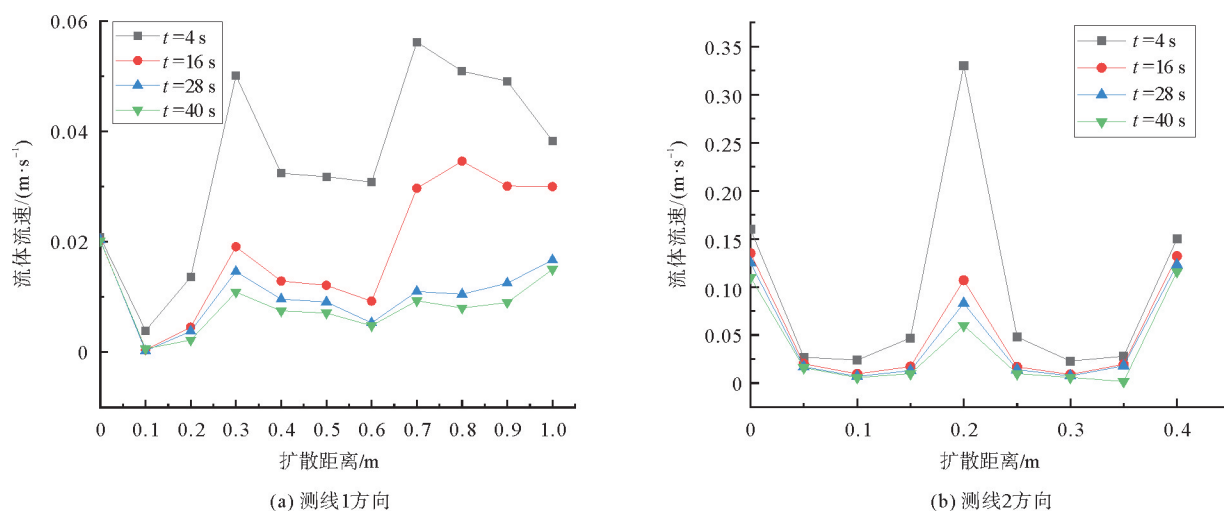


图 10 JRC 为 18~20 时流体流速变化

Fig. 10 Change in fluid flow velocity when JRC is in 18~20

裂隙粗糙度对流体流速的影响如图 11 所示。在测线 1 上,JRC 越低,流体受到的阻力越小,在顺水流方向的流速越大。在靠近出口处的流体流速发生改变主要是由浆液扩散速度引起的流体流速的差异;JRC 越小浆液越容易达到出口,此时出口处流速主要是浆液流速,为扩散末端流速,流速较低;JRC 越大,浆液越难到达出口,此时出口处流速主要为地下水水流速,其流速更接近入口设置的水流流速。如图 11(b)中所示,测线 2 上的流速差异主要集中在横向边界处,JRC 越大,浆液在横向边界累积越多,水流扩散通道截面面积变窄,致使流体流速增大。

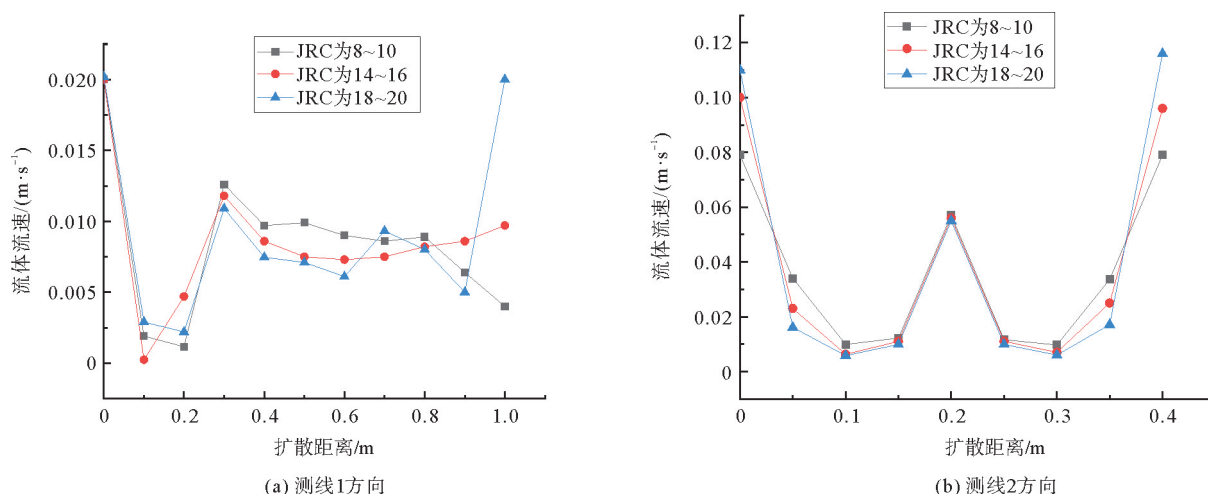


图 11 裂隙粗糙度对流体流速的影响

Fig. 11 Influence of fracture roughness on fluid flow velocity

2.4 裂隙粗糙度对截面流量及封堵率影响分析

通过分析注浆前后出口截面处动水流量的变化,可以得到浆液堵水效果的判断依据。本研究试验通过收集注浆前后水流量的变化来评价注浆效果,注浆过程计时 40 s,封堵率(S_E)的计算式为:

$$S_E = \frac{Q_0 - Q_{\text{grout}}}{Q_0} \times 100\% \quad (7)$$

式中: Q_0 为注浆封堵前初始动水流量, m^3/s ; Q_{grout} 为注浆封堵后的动水流量, m^3/s 。本研究采用 Sui 等^[24]提出的注浆效果划分方法,将注浆封堵效果划分为六个等级,如表 2 所示。

不同裂隙粗糙度对截面流量及封堵率的影响如图 12 所示。由图 12(a)可见,在注浆开始时,注浆孔处压力最大,有少量的浆液从注浆孔附近流出, JRC 越小,浆液及水扩散阻力越小,同等条件下流出的浆液和水就越少,因此初始截面的流量就越不同。JRC 越大,浆液扩散速度越慢,同等时间封堵的区域越小,对应水在出口处的流量越多,截面流量下降越慢;同理, JRC 越小,浆液扩散速度越快,同等时间封堵区域越大,对应水在出口处的流量越少,截面流量下降越快。当 JRC 为 8~10 时,截面流量差值可达 73.4%,当 JRC 为 18~20 时,截面流量差值为 68%。

表 2 注浆封堵效果等级划分

Table 2 Grading of grouting plugging effect

等级	封堵率/%	效果
1	$S_E \geq 90$	非常好
2	$80 \leq S_E < 90$	好
3	$50 \leq S_E < 80$	一般
4	$30 \leq S_E < 50$	差
5	$10 \leq S_E < 30$	非常差
6	$S_E < 10$	失败

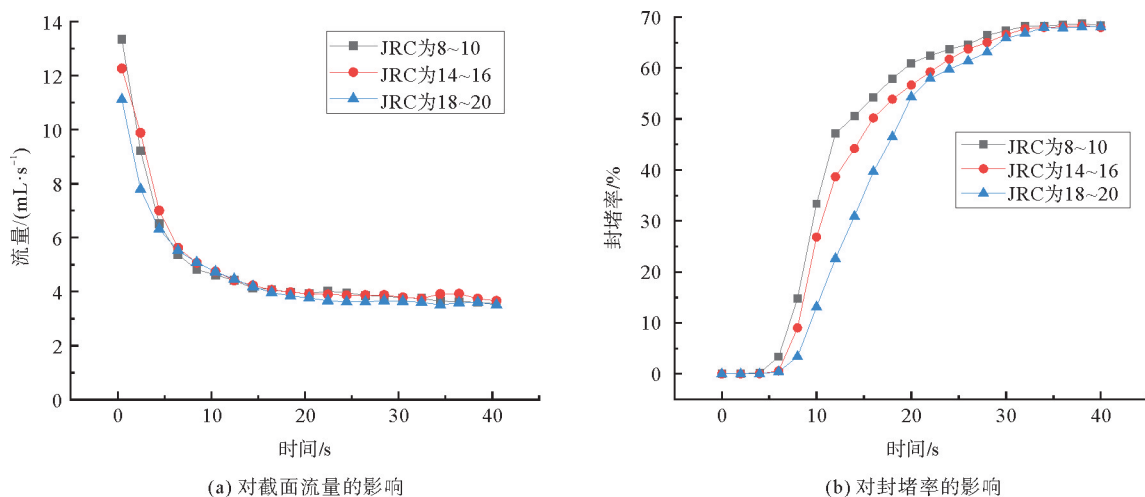


图 12 不同裂隙粗糙度对截面流量及封堵率的影响

Fig. 12 Influence of different joint roughness coefficients on section flow

由图 12(b)可见,三种工况封堵率均在 70%左右,这可能是由于注浆压力过小和浆液特性导致的。在同等封堵率条件下,截面流量变化越大,说明浆液封堵效率越高,注浆封堵所用时间越短,并且 JRC 越小,达到最大封堵率的速度越快, JRC 为 18~20 时达到最大封堵率所用时间是 JRC 为 14~16 时的 1.18 倍,是 JRC 为 8~10 时的 1.43 倍。

3 相似试验验证

3.1 模型制备与试验系统搭建

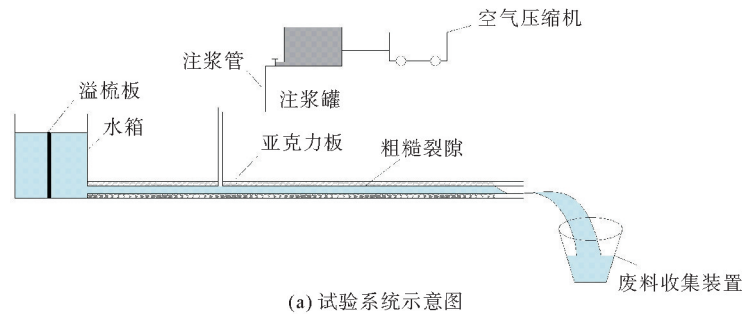
为验证本研究构建的数值模型模拟结果的可靠性,利用 3D 打印技术打印三种相同尺寸、不同粗糙度的裂隙模型,如图 13 所示。利用空气压缩机、注浆罐、供水桶等设备搭建裂隙动水注浆相似试验系统,开展裂

隙动水注浆相似试验。相似试验系统示意图及相关设备如图 14 所示。

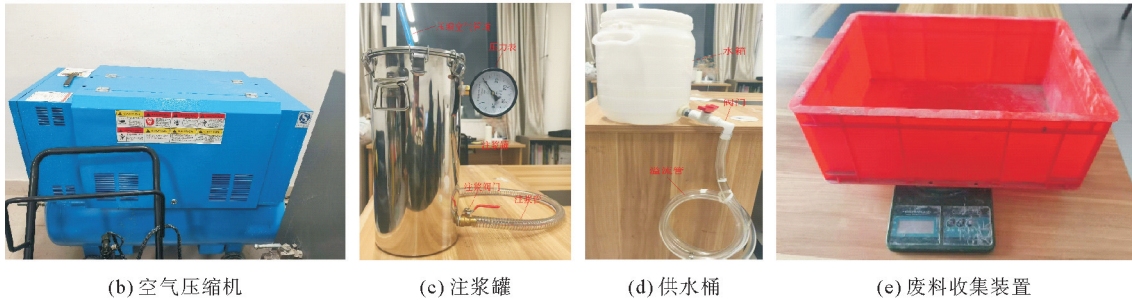


图 13 3D 打印的粗糙裂隙模型

Fig. 13 3D printed rough fracture model



(a) 试验系统示意图



(b) 空气压缩机

(c) 注浆罐

(d) 供水桶

(e) 废料收集装置

图 14 相似试验系统及相关设备

Fig. 14 Similarity experiment system and related equipment

3.2 浆液扩散形态对比

分别对三组不同裂隙粗糙度的模型进行注浆试验,利用相机记录注浆前、后期呈现的扩散形态,选取具有代表性的 JRC 为 18~20 时浆液扩散形态进行分析,其浆液扩散形态如图 15(a)、图 15(b)所示,对比数值模拟试验中浆液前、后期的扩散形态图 6(c)、图 6(h)可见,相似试验与数值模拟的浆液前、后期扩散形态均呈近似“U”形分布,两种试验呈现的结果基本吻合,表明数值模型对浆液扩散形态的模拟结果是可信的。

3.3 浆液封堵率对比

基于该相似试验平台,通过收集入口水流量和废料桶里剩余水流量的差值对三种工况下浆液封堵率进行测算,得到三种工况下的封堵率如表 3 所示。由表 3 可以看出,尽管两种试验封堵率不完全相同,但整体封堵率基本吻合,也进一步验证了本研究建立的数值模型的可靠性。造成两种试验封堵率不完全相同的原因可能相似试验模型边界存在摩擦效应或渗流边界不完全封闭,而数值模拟试验中为理想固定边界(无滑移壁面),导致浆液在近边界处流动行为不同,使封堵率不完全相同。

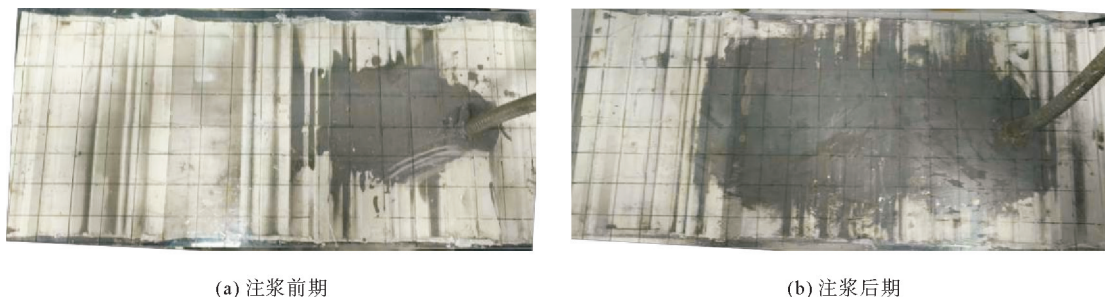


图 15 相似试验浆液前、后期扩散形态

Fig. 15 Grout diffusion patterns in similarity experiments during the early and late stages

表 3 相似试验与数值模拟试验封堵率对比

Table 3 Comparison of sealing efficiency results between similarity experiments and numerical simulation experiments

工况	JRC	数值模拟试验封堵率/%	相似试验封堵率/%
工况 1	8~10	73.4	77.3
工况 2	14~16	70.2	74.6
工况 3	18~20	68.0	73.4

4 结论

本研究采用 COMSOL Multiphysics 软件,在同等注浆条件下选用不同粗糙度的裂隙模型,分析了不同裂隙粗糙度对浆液扩散形态、浆液压力、流体流速、出口截面流量及封堵率的影响,得出如下结论。

1) 随着 JRC 的增加,浆液沿水流方向扩散距离减小,但横向扩散距离变化不大;浆液压力除了受 JRC 的影响外,还与注浆孔位置相关,远离注浆孔的区域压力显现不明显。

2) 沿水流方向的流体流速随 JRC 的增加而降低,但浆液的横向扩散累积会挤压导水通道,导致地下水流出水通道变窄,水流流速增大。

3) JRC 的增加会缩短浆液扩散距离而造成浆液堆积,致使浆液压力增大,浆液堆积造成中间区域水流速度减缓,水流受浆液阻碍向两侧边界流动,浆液的横向扩散导致导水通道变窄,致使水流速度增大。

4) 裂隙粗糙度越小,浆液扩散封堵区域的范围越大,截面初始动水流量与出口动水流量的差值越大、JRC 为 8~10 时差值达 73.4%。同等封堵率条件下,动水流量差值越大,注浆封堵所需时间越短,注浆封堵效率越高。

5) 利用相似试验对浆液扩散形态和封堵率进行了验证,试验结果与数值模拟结果基本吻合,表明本研究建立的数值模型是可靠的,可以用来模拟更大范围的裂缝,为工程应用提供参考。

本研究主要利用数值模拟,辅助相似试验,验证了数值模型的可行性,但尚未在实际工程现场开展试验研究,后续将到工程现场开展注浆试验,进一步验证浆液扩散规律。

参考文献:

- [1] 杜磊,王育平,明德志.基坑卸荷开挖对下卧地铁隧道影响的数值分析[J].山东科技大学学报(自然科学版),2016,35(6): 62-67.
DU Lei,WANG Yuping,MING Dezhi. Numerical analysis of influence of pit unloading on underlying metro tunnel[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2016,35(6):62-67.
- [2] 胡少银,刘泉声,李世辉,等.裂隙岩体注浆理论研究进展及展望[J].煤炭科学技术,2022,50(1):112-126.
HU Shaoyin,LIU Quansheng,LI Shihui,et al. Advance and review on grouting critical problems in fractured rock mass[J].

- Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 112-126.
- [3] 康永水, 耿志, 刘泉声, 等. 我国软岩大变形灾害控制技术与方法研究进展[J]. 岩土力学, 2022, 43(8): 2035-2059.
KANG Yongshui, GENG Zhi, LIU Quansheng, et al. Research progress on support technology and methods for soft rock with large deformation hazards in China[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(8): 2035-2059.
- [4] 李术才, 张伟杰, 张庆松, 等. 富水断裂带优势劈裂注浆机制及注浆控制方法研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 744-752.
LI Shucai, ZHANG Weijie, ZHANG Qingsong, et al. Research on advantage-fracture grouting mechanism and controlled grouting method in water-rich fault zone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 744-752.
- [5] 刘泉声, 邓鹏海, 毕晨, 等. 深部巷道软弱围岩破裂碎胀过程及锚喷-注浆加固 FDEM 数值模拟[J]. 岩土力学, 2019, 40(10): 4065-4083.
LIU Quansheng, DENG Penghai, BI Chen, et al. FDEM numerical simulation of the fracture and extraction process of soft surrounding rock mass and its rockbolt-shotcrete-grouting reinforcement methods in the deep tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(10): 4065-4083.
- [6] ERIKSSON M, STILLE H, ANDERSSON J. Numerical calculations for prediction of grout spread with account for filtration and varying aperture[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2000, 15(4): 353-364.
- [7] ZOU L, HÅKANSSON U, CVETKOVIC V. Two-phase cement grout propagation in homogeneous water-saturated rock fractures[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 106: 243-249.
- [8] 张乐, 杨志兵, 李东奇, 等. 浆液在透明复制裂隙中驱替行为的可视化试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(6): 1708-1718.
ZHANG Le, YANG Zhibing, LI Dongqi, et al. Investigation into displacement behavior of grout in a transparent fracture replica through visualized experiments[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(6): 1708-1718.
- [9] 杨坪, 孙雪青. 动水环境下粗糙单裂隙注浆数值模拟[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(4): 950-954.
YANG Ping, SUN Xueqing. Rough single fracture grouting numerical simulation in hydrodynamic environment[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(4): 950-954.
- [10] WANG Y H, YANG P, LI Z T, et al. Experimental-numerical investigation on grout diffusion and washout in rough rock fractures under flowing water[J/OL]. Computers and Geotechnics, 2020, 126. DOI:10.1016/j.compgeo.2020.103717.
- [11] 李术才, 张霄, 张庆松, 等. 地下工程涌突水注浆止水浆液扩散机制和封堵方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(12): 2377-2396.
LI Shucai, ZHANG Xiao, ZHANG Qingsong, et al. Research on mechanism of grout diffusion of dynamic grouting and plugging method in water inrush of underground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(12): 2377-2396.
- [12] 熊加路. 考虑岩体裂隙粗糙度的动水注浆模拟试验[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017: 12-20.
XIONG Jialu. Experimental investigation on grouting into rock fracture with flowing water by considering its roughness [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017: 12-20.
- [13] 曹健. 三维正交裂隙网络动水注浆耦合试验研究[J]. 中国水能及电气化, 2019(11): 31-35.
CAO Jian. Experimental study on dynamic water grouting coupling of three-dimensional orthogonal fracture network[J]. China Water Power and Electrification, 2019(11): 31-35.
- [14] 王培涛, 黄浩, 张博, 等. 基于 3D 打印的粗糙结构面模型表征及渗流特性试验研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(3): 725-736.
WANG Peitao, HUANG Hao, ZHANG Bo, et al. Characterization of rough fracture model and the seepage characteristics based on 3D printing technology[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(3): 725-736.
- [15] 张雅慧, 汪丁建, 唐辉明, 等. 基于 PFC^{2D} 数值试验的异性结构面剪切强度特性研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(4): 1031-1041.
ZHANG Yahui, WANG Dingjian, TANG Huiming, et al. Study of shear strength characteristics of heterogeneous discontinuities using PFC^{2D} simulation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(4): 1031-1041.
- [16] 刘健, 刘人太, 张霄, 等. 水泥浆液裂隙注浆扩散规律模型试验与数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(12): 2445-2452.
LIU Jian, LIU Rentai, ZHANG Xiao, et al. Diffusion law model test and numerical simulation of cement fracture grouting [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(12): 2445-2452.
- [17] 刘人太, 张连震, 张庆松, 等. 速凝浆液裂隙动水注浆扩散数值模拟与试验验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(增 1):

3297-3306.

LIU Rentai, ZHANG Lianzhen, ZHANG Qingsong, et al. Numerical simulation of crack grouting process of quick setting slurry with running water and its experimental verification[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S1): 3297-3306.

- [18] 樊嘉伟, 李红星. 基于 COMSOL Multiphysics 的十字状裂隙中流体运动特征分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(8): 2968-2974.

FAN Jiawei, LI Hongxing. Analysis on fluid flow properties in interconnected fractures based on comsol multiphysics[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(8): 2968-2974.

- [19] 罗平平, 何山, 张玮, 等. 岩体注浆理论研究现状及展望[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2005, 21(1): 46-48.

LUO Pingping, HE Shan, ZHANG Wei, et al. Present situation of study on grouting theories in rock masses and its prospect[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2005, 21(1): 46-48.

- [20] OLSSON E, KREISS G. A conservative level set method for two phase flow[J]. Journal of Computational Physics, 2005, 210(1): 225-246.

- [21] 周文武, 韩承豪, 张伟杰, 等. 井筒冻结孔环形通道注浆扩散机制及注浆封堵设计方法[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2021, 40(1): 17-26.

ZHOU Wenwu, HAN Chenghao, ZHANG Weijie, et al. Grouting diffusion mechanism and plugging design method of annular channel in shaft freezing hole[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2021, 40(1): 17-26.

- [22] ZHU G X, ZHANG Q S, LIN X, et al. Analysis of the sealing mechanism of cement-sodium silicate grout in rock fractures with flowing water[J/OL]. Water, 2020, 12(7). DOI:10.3390/w12071935

- [23] BARTON N. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses; International society for rock mechanics[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts, 1978, 15: 319-368.

- [24] SUI W H, LIU J Y, HU W, et al. Experimental investigation on sealing efficiency of chemical grouting in rock fracture with flowing water[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 50: 239-249.

(责任编辑: 齐敏华)